

**О. В. КУЛАПИН, К. В. МАХОТИЛО**

## **ПІДХОДИ ДО ВИЗНАЧЕННЯ ТА СТАН РОЗВИТКУ КОНЦЕПЦІЙ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ЕНЕРГОСИСТЕМ І ВІРТУАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ**

У роботі виконано аналіз сучасного стану розвитку та нормативного визначення концепцій інтелектуальних енергосистем, енергетичних просьюмерів і віртуальних електростанцій в Європейському Союзі та США. Визначено базові складові поняття Smart Grid, які є спільними для підходів в цих країнах, а також ключові особливості, що їх відрізняють. Показано взаємозв'язок понять енергетичних просьюмерів та віртуальних електростанцій. Зазначено, що ключовими факторами, що забезпечують розвиток усіх цих технологій, є стрімке зростання відновлюваної генерації та невідпинні зусилля з запобігання змінам клімату в усьому світі. Виконано аналіз розроблених схем організації віртуальних електростанцій та функцій їх учасників. Показано, що технологічною базою для їх функціонування мають стати інтелектуальні електромережі. Грунтуючись на огляді літератури, зроблено висновки про актуальність впровадження інтелектуальних електромереж та віртуальних електростанцій в об'єднаній енергосистемі України задля підтримки подальшого розвитку відновлюваної генерації. При цьому відмічена необхідність застосування не лише нормативних документів ЄС, але й врахування підходів США.

**Ключові слова:** смарт мережа, споживач-просьюмер, віртуальна електростанція.

**A. V. KULAPIN, K. V. MAKHOTILO**

## **ПОДХОДЫ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ И СОСТОЯНИЕ РАЗВИТИЯ КОНЦЕПЦИЙ ИНТЕЛЕКТУАЛЬНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ И ВИРТУАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

В работе выполнен анализ современного состояния развития и нормативного определения концепций интеллектуальных энергосистем, энергетических просьюмеров и виртуальных электростанций в Европейском Союзе и США. Определены базовые составляющие понятия Smart Grid, которые являются общими для подходов в этих странах, а также ключевые особенности, которые их отличают. Показана взаимосвязь понятий энергетических просьюмеров и виртуальных электростанций. Отмечено, что ключевыми факторами, определяющими развитие всех этих технологий, является стремительный рост возобновляемой генерации и неустанные усилия по предотвращению изменения климата во всем мире. Выполнен анализ разработанных схем организации виртуальных электростанций и функций их участников. Показано, что технологической базой для их функционирования должны стать интеллектуальные электросети. Основываясь на обзоре литературы, сделаны выводы об актуальности внедрения интеллектуальных электросетей и виртуальных электростанций в объединенной энергосистеме Украины для поддержания дальнейшего развития возобновляемой генерации. При этом отмечена необходимость использования не только нормативных документов ЕС, но и учета подходов США.

**Ключевые слова:** смарт сеть, потребитель-просьюмер, виртуальная электростанция.

**O. V. KULAPIN, K. V. MAKHOTILO**

## **APPROACHES TO THE DEFINITION AND DEVELOPMENT STATE OF SMART GRID AND VIRTUAL POWER PLANTS CONCEPTS**

The paper analyzes the current state of development and regulatory definition of the Smart Grid, energy Prosumers and Virtual Power Plants concepts in the European Union and the USA. The basic components of the Smart Grid that are common to these countries approaches are identified, as well as the key features that distinguish them. The connection of the Prosumers and Virtual Power Plants concepts is shown. It is stated that the key factors that drive the development of all these technologies are the worldwide rapid growth of renewable generation and the continued efforts to prevent climate change. The possible Virtual Power Plants schemes and their participant's functions are analyzed. It has been shown that Smart Grid should become the technological base for its functioning. Based on the literature review, it is concluded that the implementation of Smart Grids and Virtual Power Plants in power system of Ukraine is urgent in order to support the further renewable generation grow. At the same time, it is noted the need to apply not only EU regulations acts, but also take into account US regulation approaches.

**Keywords:** smart grid, prosumer, virtual power plant

**Вступ.** У світі спостерігається швидке зростання попиту на енергію. International Energy Outlook 2019 прогнозує [1], що в період між 2018 та 2050 рр. через зростання попиту, збільшення частки відновлюваної генерації, економічні та політичні чинники щорічне збільшення світового споживання енергії становитиме 3%. Загальносвітовою тенденцією в цей час стане перехід від невідновлюваних до відновлюваних джерел енергії. Крім того, для керування більш масштабними енергосистемами односпрямована модель енергетики «постачальник-споживач» має перетворитися на двонаправлену енергоінформаційну модель [2]. Базою для цих перетворень має стати концепція розумних

(інтелектуальних) енергомереж (енергосистем), відомих як «Smart Grid».

Термін Smart Grid почав широко вживатись з 2003 р., коли його вперше було використано в статті М. Burr [3]. Зокрема, в цій роботі було представлено бачення економічних та технічних проблем енергосистем, які можуть бути компенсовані шляхом створення Smart Grid систем. Надалі в різноманітних дослідженнях поняття «Smart Grid» почало розвиватись і варіюватись, зберігаючи, тим не менш, декілька ключових ознак.

Так у доповіді Канадської електричної асоціації [4], на основі аналізу провідних наукових робіт, стійкими економічними і безпековими особливостями

© О. В. Кулапін, К. В. Махотіло 2019

усіх варіантів систем Smart Grid визначено: комунікацію [5], інтеграцію та автоматизацію [6]. Відповідно до цих особливостей, в [4] надано наступне визначення. «Smart Grid» – це набір застосунків, заснованих на сучасних інформаційних технологіях, методах автоматизації процесів та досягнутому високому рівні автоматизації електромереж, який поєднує поведінку усіх підключених споживачів і дії усіх джерел енергії за допомогою розосереджених засобів зв'язку, щоб забезпечити стійке, економічне і надійне енергопостачання. Smart Grid використовує інформаційні та комунікаційні технології для підвищення надійності, доступності, гнучкості та ефективності енергопостачання [7].

На сьогодні основним рушієм розвитку та впровадження Smart Grid є усвідомлення зацікавленими сторонами (комунальними підприємствами, постачальниками енергії, виробниками, регулюючими органами, споживачами і їх суспільними представниками), а також урядами країн необхідності вирішення складних питань подальшого розвитку енергетики. При цьому особливості місцевих факторів і проблем в різних країнах суттєво впливають на пріоритети в підходах до створення і розвитку інтелектуальних енергосистем.

Зараз у всьому світі широкі суспільні кола активно чинять тиск на владні інститути з метою рішучого скорочення викидів парникових газів та збільшення частки виробництва енергії відновлюваними джерелами. Smart Grid розглядаються як важливий інструмент, що дозволить досягнути цієї мети. Але й поза економічними і політичними мотивами, широке впровадження Smart Grid все більше відповідає сучасному стану розвитку інформаційних технологій, засобів зв'язку, систем зберігання енергії та готовності споживачів відігравати активну роль в оптимізації роботи енергосистеми. Більш того, Smart Grid можуть стати технологічною основою для розвитку нових спільнот споживачів типу просьюмер [8] та їх об'єднання у віртуальні електричні станції.

**Мета статті.** Аналіз підходів до визначення і особливостей розвитку концепції інтелектуальних енергосистем в країнах ЄС та США, виявлення її взаємозв'язку з іншими концепціями сталого розвитку енергетики, такими як споживачі-просьюмери та віртуальні електростанції.

**Концепція Smart Grid в ЄС та США.** В країнах ЄС одним з головних факторів, що забезпечив зростання уваги до розвитку Smart Grid стала лібералізація енергетичного ринку в період між 1996 і 2009 рр. Ця зміна правил регулювання надала учасникам ринку недискримінаційний і прозорий доступ до енергетичних мереж, юридично розмежувала діяльність з виробництва, розподілу й постачання енергії. Також вона відкрила шлях до широкого використання децентралізованих відновлюваних джерел енергії та перетворення звичайних споживачів електроенергії в активних споживачів, та в їх новий тип – просьюмерів [9].

Викликане цими змінами значне зростання швидкості процесів, що відбуваються на

енергетичному ринку, кількості його учасників та обсягів обміну інформацією вимагає створення нових інтелектуальних енергосистем.

Інший фактор, що визначає необхідність створення та розвитку Smart Grid в ЄС, – це активна підтримка розвитку відновлюваної енергетики. Вона закладена в основу політики розвитку енергетики ЄС стратегією «Європа 2020» та довгостроковою всеосяжною «Дорожньою картою 2050 року» [10]. Ці стратегії та відповідна їм Директива RES (2009/28/EC) про сприяння використанню енергії з відновлюваних джерел [11], зокрема, встановлюють обов'язкову мету збільшити до 2030 р. частку відновлюваних джерел енергії в ЄС щонайменше до 27% та кількість цільових приєднань відновлюваних джерел енергії до електромереж щонайменше на 15%.

В ЄС досі немає окремого юридичного визначення технічних вимог до самих Smart Grid, проте вони згадуються у інших нормативах та керівних документах. Так в преамбулі Директиви ІЕМ (2005/89/EC) про внутрішні енергетичні ринки [12] зазначається, що «держави-члени повинні заохочувати модернізацію розподільних мереж, наприклад, шляхом введення інтелектуальних мереж, які повинні бути побудовані таким чином, щоб залучати децентралізовану генерацію та енергоефективні системи». Організація Європейська технологічна платформа для Smart Grid (Smart Grid ETP) [13] просуває закріплення визначення поняття Smart Grid, запропонованого Канадською електричною асоціацією. Проте наразі, в ЄС до категорії Smart Grid відносяться будь-які модернізовані електричні мережі, в які були додано двосторонній цифровий зв'язок між постачальником і споживачем та інтелектуальні системи вимірювання й моніторингу.

В той же час, в нормативних документах ЄС багато уваги приділяється визначенню елементів та учасників енергетичного ринку, які будуть активно взаємодіяти в межах Smart Grid. Наприклад, переглянуті версії Директиви ІЕМ, [12] та Директиви RES [11], вводять наступні важливі поняття.

Активний споживач – абонент електричної мережі, який споживає, зберігає або продає електроенергію, вироблену в його помешканні. Устаткування активного споживача для виробництва енергії може управлятися третьою стороною.

Відновлюваний самоспоживач – активний споживач, який споживає і може зберігати й продавати відновлювану електроенергію, вироблену в його приміщеннях, включаючи багатоквартирні будинки, комерційні або суспільні об'єкти.

Точка зарядки електромобіля – інтерфейс, здатний заряджати або замінювати акумулятор одного електромобіля за один раз. Робота точки зарядки за певних умов може управлятися оператором розподільчої системи.

Агрегатор – учасник ринку, який об'єднує численні навантаження або генерацію електроенергії споживачів для продажу або купівлі на будь-якому організованому енергетичному ринку.

Місцевий енергетичне співтовариство – кооператив, некомерційна організація або інша юридична особа, контрольована місцевими учасниками, що беруть участь у розподіленій генерації, яка виконує обов'язки оператора розподільної системи, постачальника або агрегатора на місцевому рівні.

Спільнота відновлюваної енергії – об'єднання, яке має право виробляти, споживати, зберігати і продавати відновлювану енергію.

Завдання Smart Grid, згідно цим оновленим директивам, полягає в тому, щоб дозволити вказаним активним учасникам ринку самостійно споживати енергію без невинуватених обмежень і отримувати винагороду за електроенергію, яку вони передають в мережу.

В США історія розвитку Smart grid має свої особливості як у визначенні термінів так і у пріоритетах.

Міністерство енергетики США (DOE) визначає Smart Grid [14] як автоматизовану, широко розподілену енергетичну мережу, яка характеризується двостороннім потоком електроенергії та інформації, здатна контролювати всі елементи енергосистеми: від електростанцій до клієнтів і окремих пристроїв, надає енергосистемі можливості розподілених обчислень і комунікації для обробки інформації в режимі реального часу, забезпечення майже постійного балансу попиту та пропозиції на рівні пристроїв.

Завдання створення Smart Grid енергомереж в США закріплене законом про енергетичну незалежність і безпеку (EISA-2007) [15]. Згідно з ним енергетична політика держави полягає в підтримці модернізації національної системи передачі і розподілу електроенергії, підтримці надійної і безпечної електроенергетичної інфраструктури, здатної відповідати майбутньому зростанню попиту. Метою політики є досягнення наступних параметрів, які разом характеризують оновлену електроенергетичну інфраструктуру як Smart Grid:

- широке використання цифрової інформації та технологій управління для підвищення надійності, безпеки та ефективності електричної мережі;
- динамічна оптимізація операцій і ресурсів енергосистеми, при повній кібербезпеці;
- розгортання і інтеграція розподіленої генерації, включаючи відновлювані ресурси;
- розробка й інтеграція в процес керування ресурсів зі сторони попиту і ресурсів енергоефективності;
- розгортання Smart-технологій (автоматизованих інтерактивних технологій оптимізації роботи мережних та споживчих пристроїв у реальному часі) для вимірювання, передачі даних про роботу й стан мережі та автоматизації розподілу енергії;
- інтеграція Smart приладів і Smart споживчих пристроїв;
- розгортання і інтеграція технологій управління піковим навантаженням та зберіганням енергії, включаючи електричні транспортні засоби та системи кондиціонування з накопиченням тепла;

– надання споживачам своєчасної інформації і варіантів управління;

– виявлення та зниження необґрунтованих або непотрібних бар'єрів для впровадження технологій, практик і послуг Smart Grid.

Порівнюючи розвиток концепції Smart Grid в країнах ЄС та США можна відмітити, що офіційне визначення цього поняття за суттю не відрізняється. Так саме і з функціональної точки зору, в усіх країнах-лідерах за Smart Grid закріплюються завдання полегшення підтримання балансу виробництва і споживання на рівні споживачів, полегшення інтеграції до управління енергосистемою споживачів, систем зберігання енергії і ресурсів енергоефективності, забезпечення постійного обміну інформацією [16].

Але законодавчо закріплені пріоритети створення та розвитку Smart Grid мають свої особливості. Так в країнах ЄС розвиток технологій Smart Grid, в першу чергу, розглядається як шлях суттєвого збільшення частки відновлюваної генерації. В США серед цілей розвитку Smart Grid більший акцент робиться на створення надійної та безпечної (зокрема кібербезпечної) енергосистеми.

**Просьюмери та віртуальні електростанції в межах концепції Smart Grid.** Розвиток технологій інтелектуальних мереж взаємопов'язаний з виникненням та розвитком нового типу активного споживача енергії – «просьюмера».

Неологізм «просьюмер» походить від поєднання англійських слів «виробник» та «споживач», та широко застосовується в сучасній економічній теорії. В енергетиці просьюмери відрізняються від традиційних споживачів електроенергії тим, що не лише споживають з мережі, але й генерують, активно передають та зберігають енергію. Просьюмери можуть продавати надлишкову електроенергію не лише просто в мережу, а й адресно своїм власним споживачам [17]. До просьюмерів відносяться, перш за все, власники систем відновлюваної генерації, зокрема фотоелектричних систем.

В ЄС Директива RES (2009/28/EC) [11] характеризує просьюмера як активного «самоспоживача», який генерує енергію для самостійно споживання та, можливо, для продажу в електромережу. В нормативах США просьюмером вважається споживач, який протягом певних годин доби виробляє більше енергії, ніж споживає (без уточнення факту продажу).

С точки зору енергосистеми просьюмери здатні покращити ефективність роботи енергомережі, підтримати баланс місцевого попиту і пропозиції [18], зменшити коливання потужності та перетоки енергії в розподільних мережах за рахунок власних ресурсів керування споживанням побутових приладів та накопичення енергії [19].

Інформаційна та технічна підтримка діяльності такого типу споживачів вимагає наявності у енергомережі інтелектуальних властивостей. Тому згідно з визначенням в [20] просьюмери також характеризуються використанням інтелектуальних вимірювальних приладів, здатних здійснювати облік та

керування генерацією енергії, інтегруватися з системами управління побутовими електроприладами, накопичувачами енергії, електромобілями, підтримувати роботу з системами «мережа-мережа» в межах Smart Grid.

Окрім розвитку технологій Smart Grid до чинників, що підтримують виникнення і поширення просьюмерів, також належать урядові програми стимулювання і заохочення участі в роботі енергосистеми, та активні громадські кампанії щодо зменшення шкідливого впливу енергетики на навколишнє середовище [21].

Подальшим розвитком концепції просьюмерів є об'єднання в спільноти чи мережі просьюмерів, які мають спільну мету і схожу поведінку (в сенсі режимів споживання та генерування енергії), задля спільної участі у конкурентному енергетичному ринку. При досягненні певного обсягу такі спільноти можуть виступати як єдина потужна віртуальна електростанція (ВіртЕС).

Концепція ВіртЕС була вперше запропонована в 2005 р. в рамках проекту FENIX [22] («Гнучка електрична мережа для інтеграції очікуваної еволюції енергії»). Тоді її головна мета визначалась, перш за все, як інтеграція ВЕР в роботу енергосистеми і операції на енергоринку. Велика кількість малопотужних розподілених відновлюваних джерел енергії мають бути об'єднані у єдину віртуальну електростанцію для спрощення керування енергосистемою, підтримання балансу споживання і генерації, забезпечення стійкості та надійності роботи мережі.

На сьогодні точні визначення поняття ВіртЕС варіюються від «комбінація розподіленої генерації, постійних і змінних навантажень, інтегрованих лініями зв'язку і методами управління в реальному часі» [23], до «система управління енергоспоживанням спільноти активних споживачів, що виглядає для енергоринку, як реальна електростанція» [24].

На рис. 1 зображені типові компоненти ВіртЕС згідно [25].

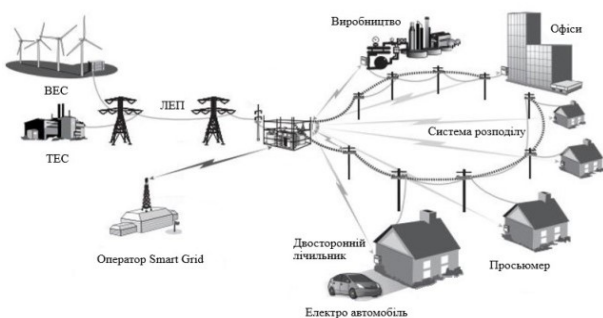


Рисунок 1 – Концептуальна схема ВіртЕС

Основою ВіртЕС є центр дистанційного управління, та Smart Grid мережа, що поєднує всіх учасників станції в межах енергосистеми. Програмне забезпечення центра дистанційного управління, ефективно координує і контролює роботу розподілених генераторів, систем зберігання енергії та регульованого навантаження, зокрема просьюмерів.

Стохастичний характер генерації окремих відновлюваних джерел енергії компенсується в межах ВіртЕС великою кількістю генераторів, ресурсами управління споживанням та акумулюванням енергії. В результаті, для енергосистеми всі ці об'єкти виступають, як велика централізована електростанція зі звичайним, чи навіть більш високим рівнем керованості та маневреності.

З точки зору просьюмерів метою створення ВіртЕС є мінімізація їх витрат на виробництво і максимізація прибутку від володіння обладнанням. Просьюмери в «колективній» формі отримують можливість доступу до ринку електроенергії включно з ринком системних послуг. Це дозволяє їм отримувати значний прибуток навіть без спеціальних «зелених» тарифів та далі збільшувати свою потужність без обмежень зі сторони енергосистеми [26].

Існують й інші концепції ВіртЕС [27], які передбачають не централізовану, а багаторівневу ієрархічну структуру системи управління станцією та запровадження оператора ВіртЕС. Оператором ВіртЕС може бути як незалежна компанія, так і оператор місцевої розподільної мережі. Він несе відповідальність за управління ВіртЕС, координацію роботи з оператором енергоринку і локальними постачальниками комунальних послуг. В ієрархічній ВіртЕС технічне управління здійснюється засобами інтелектуальних пристроїв, встановлених у споживачів та на локальному рівні, а загальні функції диспетчеризації станції здійснюються хмарним центром управління на верхньому рівні оператора.

Варто відзначити, що, будь-яка архітектура ВіртЕС передбачає пріоритетність загальної стратегії оперативного управління станцією і певні обмеження рішень окремих учасників: споживачів, генераторів чи просьюмерів. В той же час подальший розвиток ідеї енергетичного просьюмеризма і залучення до об'єднаної енергосистеми мільйонів активних споживачів практично не можливий без координації їх роботи в межах віртуальних електростанцій.

**Висновок.** Проведений аналіз виникнення і розвитку концепцій інтелектуальних енергомереж, просьюмерів та віртуальних електростанцій свідчить, що вони досі знаходяться на етапі становлення, проте, швидко розвиваються і вже набувають точного юридичного визначення. Цей процес відбувається на фоні і значною мірою завдяки зростанню відновлюваної генерації та постійним зусиллям з запобігання змін клімату в усьому світі, і зокрема в ЄС та США. Перехід цих технологій від стану концепцій до реального широкого впровадження здатен розпочати в енергетичній галузі нову еру високої безпеки й енергоефективності енергопостачання, а також повної відкритості ринку електричної енергії.

Стрімкий розвиток відновленої генерації робить актуальним впровадження інтелектуальних енергомереж та віртуальних електростанцій і в Об'єднаній енергосистемі України. Цьому процесу сприятиме те, що Україна як Асоційований член ЄС вже адаптує нормативну базу в енергетичній сфері до загальноєвропейських норм. З іншого боку, враховуючі

зовнішні виклики національній безпеці, при розвитку Smart Grid в Україні слід використати досвід США і закріпити в базових принципах цих технологій вимоги кібербезпеки.

Враховуючи, що головним рушієм змін в енергетиці України в останній роки став «сонячний просьюмеризм», можна очікувати, що впровадження інтелектуальних енергомереж та віртуальних електростанцій також буде відбуватись «знизу», з рівня просьюмерів – власників фотоелектричних систем потужністю до кількох МВт. Тому завдання розвитку теоретичної і технологічної бази для їх функціонування в межах об'єднаної енергосистеми для суспільного блага є актуальною і важливою науковою задачею.

#### Список літератури

1. EIA. International Energy Outlook 2019. Available at: <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/index.php> (accessed on 11.01.2020).
2. El-hawary, M.E. The Smart Grid State-of-the-art and Future Trends. Electr. Power Compon. Syst. 2014, 42, 239–250.
3. Burr M. T. Reliability demands drive automation investments. Public Utilities Fortnightly, Technology Corridor department, Nov. 1, 2003.
4. Canadian Electricity Association. The smart grid. Available at: [www.electricity.ca/media/SmartGrid/SmartGridpaperEN.pdf](http://www.electricity.ca/media/SmartGrid/SmartGridpaperEN.pdf) (accessed on 11.01.2020).
5. Murphy, P., Angemeer, M., Collie, D., Fraser, N., Haines, A., McFadden, D., Major, K., Nathwani, J., Shervill, P. and Smith, W. September 2010. Enabling tomorrow's electricity system: Report of the Ontario Smart Grid Forum. Available at: [http://www.ieso.ca/imoweb/pubs/smart\\_grid/Smart\\_Grid\\_Forum-Report.pdf](http://www.ieso.ca/imoweb/pubs/smart_grid/Smart_Grid_Forum-Report.pdf) (accessed on 11.01.2020).
6. mmissions The National Association of Regulatory Utility Commissioners. June 2010. Available at: [http://www.naruc.org/Publications/NARUC\\_Smart\\_Grid\\_Factsheet%205\\_09.pdf](http://www.naruc.org/Publications/NARUC_Smart_Grid_Factsheet%205_09.pdf) (accessed on 11.01.2020).
7. DOE. Request for information. Available at: <http://www.gpo.gov/fdsys/pkg/FR-2010-05-11/html/2010-11129.htm> (accessed on 11.01.2020).
8. Б.С. Стогній, О.В. Кириленко, А.В. Праховник, С.П. Денисюк. Еволюція інтелектуальних електричних мереж та їхні перспективи в Україні. Технічна електродинаміка. - 2012. № 5. С. 52-67.
9. European Commission. SmartGrids European Technology Platform. Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future, Brussels. 2006.
10. European Commission. Smart Grids: from innovation to deployment, Brussels. 2011.
11. Directive 2009/28/ec of the european parliament and of the council of 23 April 2009. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0028> (accessed on 11.01.2020).
12. Directive 2005/89/ec of the european parliament and of the council of 18 January 2006. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2005/89/oj> (accessed on 11.01.2020).
13. European Technology Platform (ETP) SmartGrids. Available at: <https://www.edsofsmartgrids.eu/policy/eu-steering-initiatives/smart-grids-european-technology-platform/> (accessed on 11.01.2020).
14. Department of Energy (DOE). Available at: <https://www.energy.gov/science-innovation/electric-power/smart-grid> (accessed on 11.01.2020).
15. Energy independence and security act of 2007. Available at: <https://www.govinfo.gov/content/pkg/PLAW-110publ140/pdf/PLAW-110publ140.pdf> (accessed on 11.01.2020).
16. Koirala, B.; Hakvoort, R. Integrated Community-Based Energy Systems: Aligning Technology, Incentives, and Regulations. In Innovation and Disruption at the Grid's Edge; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2017; pp. 363–387.
17. Rathnayaka, A.D.; Potdar, V.M.; Kuruppu, S.J. An innovative approach to manage prosumers in Smart Grid. In Proceedings of the IEEE World Congress on Sustainable Technologies (WCST), London, UK, 7–10 November 2011; pp. 141–146.
18. Potdar, V.; Chandan, A.; Batol, S.; Patel, N. Big Energy Data Management for Smart Grids—Issues, Challenges and Recent

Developments. In Smart Cities; Springer: Cham, Switzerland, 2018; pp. 177–205.

19. El-Batawy, S.; Morsi, W.G. Optimal Design of Community Battery Energy Storage Systems with Prosumers Owning Electric Vehicles. IEEE Trans. Ind. Inform. 2017.
20. Al-Kuwari, A.M.A.; Ortega-Sanchez, C.; Sharif, A.; Potdar, V. User friendly smart home infrastructure: BeeHouse. In Proceedings of the 5th IEEE International Conference on Digital Ecosystems and Technologies (DEST), Daejeon, Korea, 31 May–3 June 2011; pp. 257–262.
21. European Commission. SmartGrids European Technology Platform. Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future, Brussels. 2006.
22. D. Pudjianto, C. Ramsay, "The virtual power plant: enabling integration of distributed generation and demand". FENIX Bulletin, 2008; vol. 2, pp. 10-16.
23. C. Chunwu, L. Na, "International experience and Enlightenment of virtual power plant development". Power grid Technology, 2013; vol. 37, no. 8, pp. 2258-2263.
24. Y. Renfeng, A. Qian, "Virtual power plant technology discussion", Electrical and Energy Efficiency Management Technology, 2014; vol. 63, no. 9, pp. 33-38,
25. H. Shahzeb,\*, M. Hafiz, A. Zenab, N. Haq, DSM Using Fish Swarm Optimization and Harmony Search Algorithm Using HEMS in Smart Grid. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, 2018.
26. Morstyn, T.; Farrell, N.; Darby, S.J.; McCulloch, M.D. Using peer-to-peer energy-trading platforms to incentivize prosumers to form federated power plants. Nat. Energy 2018; pp. 94–101.
27. Rekik, M.; Chtourou, Z.; Mitton, N.; Atieh, A. Geographic routing protocol for the deployment of virtual power plant within the smart grid. Sustain. Cities Soc. 2016; pp. 39–48.

#### References (transliterated)

1. EIA. International Energy Outlook 2019. Available at: <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/index.php> (accessed on 11.01.2020).
2. El-hawary, M.E. The Smart Grid State-of-the-art and Future Trends. Electr. Power Compon. Syst. 2014, 42, 239–250.
3. Burr M. T. Reliability demands drive automation investments. Public Utilities Fortnightly, Technology Corridor department, Nov. 1, 2003.
4. Canadian Electricity Association. The smart grid. Available at: [www.electricity.ca/media/SmartGrid/SmartGridpaperEN.pdf](http://www.electricity.ca/media/SmartGrid/SmartGridpaperEN.pdf) (accessed on 11.01.2020).
5. Murphy, P., Angemeer, M., Collie, D., Fraser, N., Haines, A., McFadden, D., Major, K., Nathwani, J., Shervill, P. and Smith, W. September 2010. Enabling tomorrow's electricity system: Report of the Ontario Smart Grid Forum. Available at: [http://www.ieso.ca/imoweb/pubs/smart\\_grid/Smart\\_Grid\\_Forum-Report.pdf](http://www.ieso.ca/imoweb/pubs/smart_grid/Smart_Grid_Forum-Report.pdf) (accessed on 11.01.2020).
6. Keogh, M. The smart grid: Frequently asked questions for state commissions The National Association of Regulatory Utility Commissioners. June 2010. Available at: [http://www.naruc.org/Publications/NARUC\\_Smart\\_Grid\\_Factsheet%205\\_09.pdf](http://www.naruc.org/Publications/NARUC_Smart_Grid_Factsheet%205_09.pdf) (accessed on 11.01.2020).
7. DOE. Request for information. Available at: <http://www.gpo.gov/fdsys/pkg/FR-2010-05-11/html/2010-11129.htm> (accessed on 11.01.2020).
8. B.S. Stohnii, O.V. Kyrylenko, A.V. Prakhovnyk, S.P. Denysuk. Eholiutsiia intelektualnykh elektrichnykh merezh ta yikhni perspektivy v Ukraini. Tekhnichna elektrodynamika. - 2012. № 5. S. 52-67.
9. European Commission. SmartGrids European Technology Platform. Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future, Brussels. 2006.
10. European Commission. Smart Grids: from innovation to deployment, Brussels. 2011.
11. Directive 2009/28/ec of the european parliament and of the council of 23 April 2009. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0028> (accessed on 11.01.2020).
12. Directive 2005/89/ec of the european parliament and of the council of 18 January 2006. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2005/89/oj> (accessed on 11.01.2020).
13. European Technology Platform (ETP) SmartGrids. Available at: <https://www.edsofsmartgrids.eu/policy/eu-steering-initiatives/smart-grids-european-technology-platform/> (accessed on 11.11.2019).

14. Department of Energy (DOE). Available at: <https://www.energy.gov/science-innovation/electric-power/smart-grid> (accessed on 11.01.2020)
15. Energy independence and security act of 2007. Available at: <https://www.govinfo.gov/content/pkg/PLAW-110publ140/pdf/PLAW-110publ140.pdf> (accessed on 11.01.2020).
16. Koirala, B.; Hakvoort, R. Integrated Community-Based Energy Systems: Aligning Technology, Incentives, and Regulations. In Innovation and Disruption at the Grid's Edge; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2017; pp. 363–387
17. Rathnayaka, A.D.; Potdar, V.M.; Kuruppu, S.J. An innovative approach to manage prosumers in Smart Grid. In Proceedings of the IEEE World Congress on Sustainable Technologies (WCST), London, UK, 7–10 November 2011; pp. 141–146.
18. Potdar, V.; Chandan, A.; Batol, S.; Patel, N. Big Energy Data Management for Smart Grids—Issues, Challenges and Recent Developments. In Smart Cities; Springer: Cham, Switzerland, 2018; pp. 177–205.
19. El-Batawy, S.; Morsi, W.G. Optimal Design of Community Battery Energy Storage Systems with Prosumers Owning Electric Vehicles. IEEE Trans. Ind. Inform. 2017.
20. Al-Kuwari, A.M.A.; Ortega-Sanchez, C.; Sharif, A.; Potdar, V. User friendly smart home infrastructure: BeeHouse. In Proceedings of the 5th IEEE International Conference on Digital Ecosystems and Technologies (DEST), Daejeon, Korea, 31 May–3 June 2011; pp. 257–262.
21. European Commission. SmartGrids European Technology Platform. Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future, Brussels, 2006.
22. D. Pudjianto, C. Ramsay, "The virtual power plant: enabling integration of distributed generation and demand". FENIX Bulletin, 2008; vol. 2, pp. 10–16.
23. C. Chunwu, L. Na, "International experience and Enlightenment of virtual power plant development". Power grid Technology, 2013; vol. 37, no. 8, pp. 2258–2263.
24. Y. Renfeng, A. Qian, "Virtual power plant technology discussion", Electrical and Energy Efficiency Management Technology, 2014; vol. 63, no. 9, pp. 33–38,
25. H. Shahzeb,\*, M. Hafiz, A. Zenab, N. Haq, DSM Using Fish Swarm Optimization and Harmony Search Algorithm Using HEMS in Smart Grid. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, 2018.
26. Morstyn, T.; Farrell, N.; Darby, S.J.; McCulloch, M.D. Using peer-to-peer energy-trading platforms to incentivize prosumers to form federated power plants. Nat. Energy 2018; pp. 94–101.
27. Rekik, M.; Chtourou, Z.; Mitton, N.; Atieh, A. Geographic routing protocol for the deployment of virtual power plant within the smart grid. Sustain. Cities Soc. 2016; pp. 39–48.

Надійшла (received) 19.12.2019

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Кулапін Олександр Валентинович (Кулапин Александр Валентинович, Kulapin Olexander Valentinovich)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0001-9283-6910; e-mail: [sasha.kulapin@gmail.com](mailto:sasha.kulapin@gmail.com)

**Махотіло Костянтин Володимирович (Махотило Константин Владимирович, Makhotilo Kostiantyn Volodymyrovych)** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри електричних станцій, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0001-7081-071X; e-mail: [kvmahotilo@gmail.com](mailto:kvmahotilo@gmail.com)